

熊本地震で被災した百間石垣に対する SPH-DEM 法による崩壊シミュレーション

法政大学大学院 学生会員 ○篠崎 将也, 正会員 酒井 久和
 神戸市 非会員 栗原 陸人
 鉄道総合技術研究所 正会員 伊吹 竜一
 鳥取大学大学院 正会員 小野 祐輔

1. はじめに

2016年熊本地震では、熊本城の石垣が甚大な被害を受け、その修復方法の検討が行われている。被災した石積み擁壁は同様の被害を起こさないためにジオテキスタイルやアンカー等を用いた補強が必要という意見がある一方、城郭石垣は文化遺産で原状復帰が基本とする向きもある。そのため、原状復帰以上の対策を採るためには、特にその有効性を示すことが必須となる。しかしながら、石垣擁壁の地震時の崩壊を精度良く再現する解析手法や対策工に対して評価できる解析手法は確立されていないのが現状である。そのため、本研究ではまず、熊本城百間石垣の熊本地震時の崩壊シミュレーションを実施し、手法の妥当性を検討した。

2. 解析手法

本研究では、百間石垣の積み石を個別要素法(以下:DEM)、栗石層・背面地盤を粒子法(以下:SPH法)の円形の粒状要素でモデル化したSPH-DEM法で解析を行う。土の弾塑性構成式には、弾完全塑性モデル、降伏基準及び塑性ポテンシャルにはDrucker-Prager式を使用する。

DEMブロック間においては、伊吹の接触力算定手法¹⁾を導入することによって噛み合わせを軽減し、過度な摩擦力の発生を抑制する。

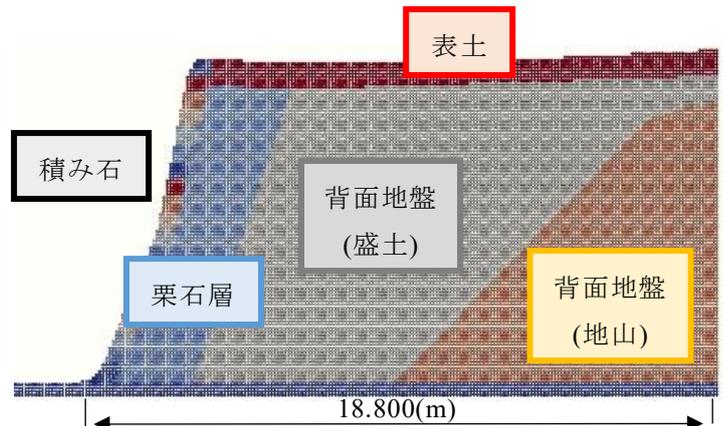


図1 百間石垣モデル

3. 数値シミュレーション

3.1 解析条件

本研究における解析モデルを図1に、解析条件を表1に示す。また、各物性値は、百間石垣の近隣にある熊本市立熊本博物館のボーリング調査結果と百間石垣のトレンチ調査、表面波探査をもとに、解析対象の地盤種類を推定し設定した²⁾。DEMとSPHのパラメータをそれぞれ表2、表3に示す。

表1 解析条件

計算時間間隔(s)	1.0×10 ⁻⁵	
減衰	α	1.0
	β	2.0

表2 DEMパラメータ

密度 (g/cm ³)		2.7	
		DEMとDEM	DEMとSPH
ばね係数 (N/m)	法線方向	1.0×10 ⁸	1.0×10 ⁸
	接線方向	1.0×10 ⁷	1.0×10 ⁷
減衰係数 (N・s/m)	法線方向	1.0×10 ³	1.0×10 ³
	接線方向	1.0×10 ³	1.0×10 ³

表3 地盤パラメータ

	密度 (t/m ³)	ヤング率 (MN/m ²)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)
背面地盤(盛土)	1.31	66.3	17.2	27.7
背面地盤(地山)	1.57	157	39.5	33.7
表土	1.53	56.7	30	24.3
裏込め層(栗石)	2.00	40.0	0	43.0

キーワード 個別要素法, SPH粒子法, 数値シミュレーション, 2次元粒状体要素解析, 熊本城百間石垣
 連絡先 〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33 法政大学デザイン工学研究科 TEL 03-5228-1347

3.2 自重解析

自重解析において、瞬時に重力加速度を作用させると、地盤の塑性域が拡大するため、3秒間で重力加速度である $-9.8(\text{m/s}^2)$ に線形で増加させ、2秒間維持させる。自重解析結果を図2に示す。ただし、解析終了時に要素の速度がほぼ終息していることを確認している。

3.3 地震時応答解析

自重解析後の応力・変形状態を初期値とし、動的解析を行う。入力地震動は熊本県熊本市中央区大江で観測された前震（観測日時：2016年4月14日21時46分）、本震（観測日時：2016年4月16日1時25分）の地震記録で、対象断面の面内方向として観測波のNS成分の主要動を抽出したものである（図3参照）。本震の記録は17秒以降で、前震と本震の最大加速度はそれぞれ364gal、627galである。

加振開始から約17秒後と40秒後の変形状態を図4、図5に示す。前震が終了後の状態は、図4から石垣の孕み出しは見られるが崩壊に至っていないことが確認できる。また、図5のように、本震時に崩壊し、その変形状態も図6に示す百間石垣断面図と概ね一致している。ただし、実被害で崩壊は石垣上1/3の部分であるのに対し、解析では下方の積み石まで移動している点が異なる。

4. まとめ

本研究では、熊本地震で被災した百間石垣崩壊断面に対してDEM-SPH法による地震応答解析を行った。結果、前震時に石垣の孕み出しが生じ、本震時に残存する積み石の数は過小評価されたものの、崩壊後の状態はほぼ再現することができた。

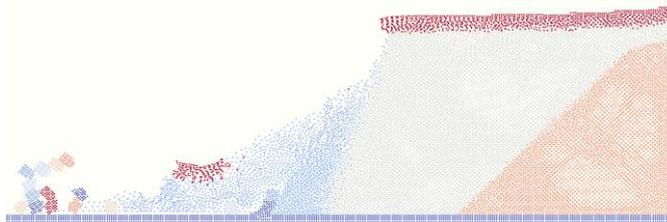


図5 変形状態（40.0秒）

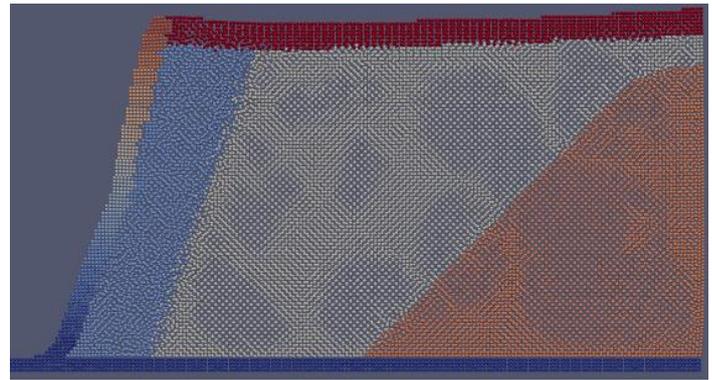


図2 自重解析後の残留変形状態（5秒）

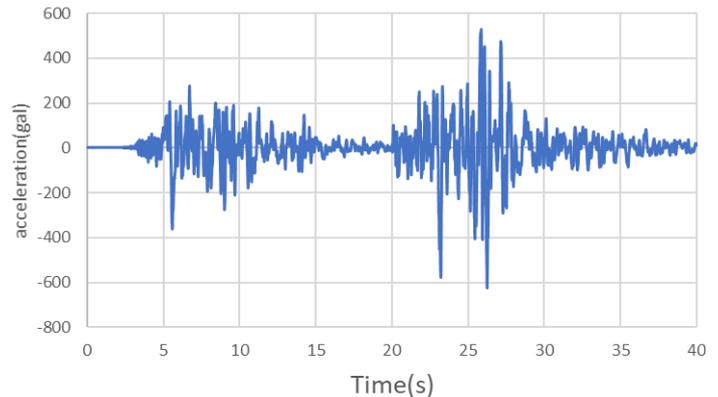


図3 地震時応答解析入力地震動(加振時間40秒)

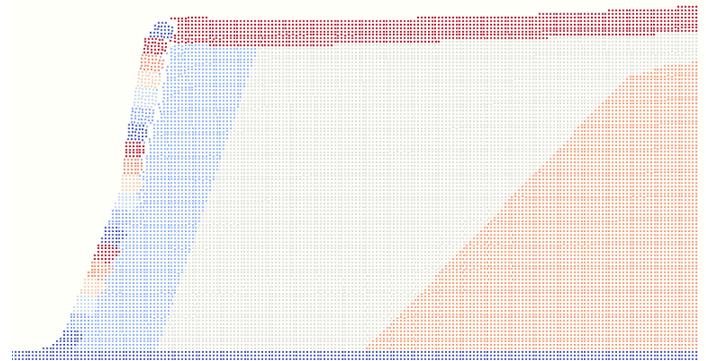


図4 変形状態（17.25秒）

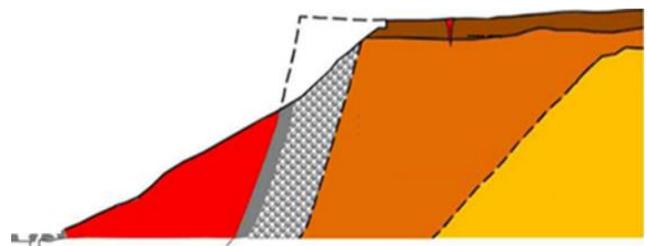


図6 百間石垣断面図

参考文献

- 1)伊吹竜一，酒井久和，小野祐輔：個別要素法（DEM）における簡易な接触力算定手法の提案，土木学会第73回年次学術講演会，2018.9.
- 2)栗原陸人：SPH-DEM法に基づく百間石垣の崩壊挙動解析，法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科卒業論文，2018.1.